

CPM・Nd:YAG レーザーのFCM 強調発振

加瀬谷 浩康* 寺前 英徳* 北嶋 巖*

Enhanced FCM of a Nd:YAG Laser in CPM Operation

Hiroyasu KASEYA, Hidenori TERAMAE and Iwao KITAZIMA

(Received Aug. 29, 1997)

The pulsewidth of a flash-lamp pumped Nd:YAG laser in linear cavity is significantly shortened by joint operation of CPM (Colliding Mode-locking) and FCM (Feedback Controlled Mode-locking). The CPM operation is done with a saturable absorber set at a quarter of the cavity length apart from the end mirror. Four pulses are generated simultaneously in the cavity. These pulses collide in the saturable dye cell and also at another quarter apart from the coupling mirror. Therefore, the FCM effect can be enhanced by pulse colliding in a GaAs wafer inserted at this position. On this joint operation, the duration of pulse train, in which the pulse interval is 2ns, is extended up to 800ns. The pulsewidth is shortened down to 3.3ps in Gaussian shape (3.0ps in sech^2), while the pulse energy is 7 μ J.

Key Words : YAG Laser, CPM, FCM, 3ps-pulse, 7 μ J, 2ns-interval.

1 はじめに

フラッシュランプ励起のモード同期固体レーザーで、高ピークパワーのパルスを得ることができる。固体レーザーの中でも、YAG レーザーは繰り返しや安定性の面で優れている。それ故、モード同期YAG レーザーのパルス幅を短縮するために、Table I で示すように様々な方法が行われてきている[1-11]。初期の頃は可飽和吸収色素(No.9860)を用いた受動モード同期発振で30psのパルスを得ている[1, 2]。緩和時間の短いKodak No.5 では15psのパルスが得られている[5]。

リング型共振器で初めて行われた衝突パルスモード同期(CPM)法が、Vanherzeelsら[12]によってYAG レーザーに適用された。彼らはantiresonant ringを結合し可飽和吸収色素内でパルスを衝突させて16psのパルスを得ている[4]。

* 電子工学科

Table I Flash-lamp pumped mode-locking Nd:YAG laser.(*for comparison)

Year	Worker	Rod	Type	Pulsewidth (ps)	Pulse energy μ J	Number of pulses	ref.
1975	H.Al-Obaidi	YAG	PML	30		10	[1, 2]
1980	H.Graener	YAG	PML + Etalon	12	200		[3]
1981	H.Vanherzeels	YAG	ARR CPM	16			[4]
1986	J.Weston	YAG	PML	15	200	13	[5]
1990	A.Del Corno	YAG	FCM	10	10	90	[6]
1990	L.Y.Liu	YAG	APM	6	0.02		[7]
1992	S.Kumazaki	Glass*	FCM	3	60	100	[8]
1995	F.Lindenberger	YLF*	KLM	3	1	2500	[9]
1996	I.Kitazima	YAG	CPM+FCM	5	10	250	[10]
1996	I.Kitazima	YAG	2CPM+FCM	4	10	250	[11]

1990年には、可飽和吸収色素によるパルス幅短縮効果を有効に働かせた、フィードバック制御モード同期(FCM)法が行われ、10psのパルスが得られている[6]。これは共振器内にネガティブフィードバック素子(NFE)を挿入し、急激な利得の立ち上がりを抑えてパルスの周回数を増加させて可飽和吸収色素による短縮効果を強めたものである。

比較的新しいモード同期法としての Additive Pulse Mode-locking(APM)法では、フラッシュランプ励起YAGレーザーで6psのパルスが得られている[7]。また、Kerr Lens Mode-locking(KLM)法では、同じくYLFレーザーで3psのパルスが得られている[9]。しかし、APM法は共振器構成が複雑であり、共振器内の損失が大きい。KLM法では自己発散効果を起こす媒質(CS₂)は高ピークパワーのパルスでは損傷してしまうという欠点があり、高出力パルスの発生には不向きである。

これに比べて、CPM法或いはFCMは共振器構成が簡単であり、高ピークパワーの超短パルスを発生させるのに適していると考えられる。これまでに、我々の研究室ではCPM発振にFCMを併用し5psのパルスを得ている[10]。更に、可飽和吸収色素セルを2枚挿入した2重CPM発振にFCMを併用して4psのパルスを得ている[11]。

本研究では、NFE内でパルスを衝突させてFCM法におけるパルス幅短縮効果を更に強めてみた。即ちCPM-FCM複合発振の改善を試みて、3psのパルス幅を得たのでその結果を報告する。

2 実験原理

2.1 CPM発振の原理

先ず、衝突パルスモード同期(CPM)法について述べる。これは共振器内に可飽和吸収色素を注入したセルを反射鏡に密着させずにある間隔をもって挿入する。そうすることにより共振器内に多数のパルスが立ち、その隣り合ったパルス同士をセル内で衝突させ重ね合わせる方法である。この方法により、パルス幅の短縮効果をより有効に行うことができる。Fig.1に各共振器内構成とそれに伴うパルスの発生を示す。

Fig.1(a)のような従来のセル密着型の場合、共振器内にパルスは1本しか立たない。また発生するパ

ルスは共振器長を L とすると $2L/c$ の間隔を持つパルス列となる。それに対し、Fig.1(b)のように共振器長の $1/2$ の位置に可飽和吸収色素セルを挿入すると共振器内にパルスは2本立ち、パルス間隔は半分の L/c になる。そして、パルスは共振器を一往復する間にセルを二回通過する。さらにFig.1(c)(d)のように $1/3$ 、 $1/4$ の位置に色素セルを挿入した場合には、パルス本数が3本、4本立ち、パルス間隔は $1/3$ 、 $1/4$ となる。 $1/4$ の場合はセルの位置の他に、もう一方の $1/4$ の位置においてもパルスを衝突させることができる。一般的にはセルを $1/m$ の位置におけば、 m 本のパルスを共振器内に同時に発生させることができる。CPM法によるパルス幅短縮の理由として可飽和吸収色素による4つの効果が考えられる。即ち(a)パルス前端部の吸収、(b)パルスの重ね合わせによる裾の吸収の増大、(c)可飽和吸収色素が異常分散媒質であることによるダウンチャープ、(d)過渡的な回折格子によるパルス後端部の散乱などである[13]。

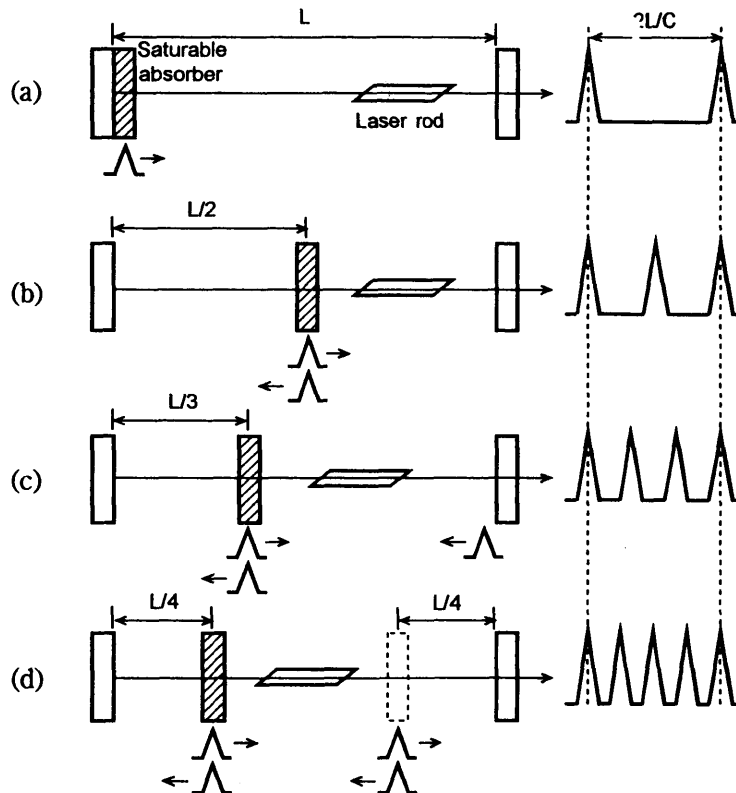


Fig.1 Schematic of colliding pulse mode-locking(CPM) using Fabry-Perot resonator.

- (a) Cell contacted on end mirror. (b) Cell position at $L/2$.
 (c) Cell position at $L/3$. (d) Cell position at $L/4$.

2.2 FCM 発振の原理

可飽和吸収色素を有効に使用して更にパルス幅を短縮させる方法としては、フィードバック制御モード同期(FCM)法の併用がある。この方法は、急激な利得の立ち上がりで飽和を抑えることで共振器内のパルス周回数を増加させ、可飽和吸収色素による上記4つの効果によるパルス幅短縮効果を強める方法である。共振器内にNegative Feedback Element(NFE)を挿入して、NFE内の2光子吸収による自己発散効果(Self-defocusing)によりエネルギー制御を行い急激な利得の立ち上りを抑えている。そ

ここで、以下では2光子吸収による自己発散効果について述べる [14]。

NFEが2光子吸収を含む場合の dz 当たりの入射光 $I(0, t)$ の減衰を表す式は線形吸収係数を α 、非線形吸収係数を β とすると

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha I - \beta I^2 \quad (1)$$

となり、式(1)により試料内を通過する光強度 $I(z, t)$ は、線形吸収 α が無視できるほど小さいとすれば、

$$I(z, t) = \frac{I(0, t)}{1 + \beta z I(0, t)} \quad (2)$$

となる。

そこでNFE内に生じる全自由キャリア数 $N(r, t)$ は、式(2)により式(3)で与えられるようになる。

$$N(r, t) = \int_0^t \left(\frac{\alpha I(r, t)}{h\nu} + \frac{\beta I^2(r, t)}{2h\nu} \right) d\tau \quad (3)$$

ここで、 h はプランク定数、 ν はレーザーの発振周波数である。

ここで光の吸収による屈折率の変化 δn が生じ、それは式(4)のように自由キャリア数に比例する形で与えられる。

$$\delta n(r, t) = -\frac{CN(r, t)e^2}{2n_0m^*\epsilon_0\omega^2} \quad (4)$$

ここで、 C は定数、 n_0 は屈折率、 e は電子の電荷、 m^* 電子の有効質量を示す。

この屈折率の変化によって、2光子吸収がある所とない所の位相差 $\delta\phi$ が生じ、凹レンズ状態になり透過光が広げられる自己発散効果が起こる。

この自己発散効果とビンホールを組み合わせることにより急激な利得の立ち上がりを抑えることができる。Fig.2に示すように、CPMのみの場合は点線のような利得曲線になるが、CPMにFCMを併用すると実線のようにパルス列が拡張される。

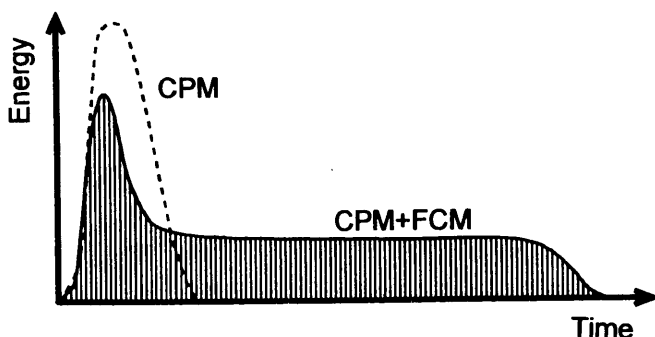


Fig.2 Envelope of pulse train.

FCM発振用素子(NFE)には、2光子吸収による自己発散効果が必要である。そのNFEとしては、Si、GaAs、CdSe、InPなどがある[14 – 16]。その中でGaAsは直接遷移半導体であり、バンドギャップは1.43eVであるからYAGレーザーの $1.064\mu\text{m}$ (1.17eV)の光に対して2光子吸収を起こす。1光子吸収は 1.2cm^{-1} と小さく、かつ2光子吸収係数の値は 26cm/GW と大きいので、FCM発振には特に有効だと考えられる。

2.3 パルスの重なりによるFCM効果の増加

CPM発振では可飽和吸収色素セルを共振器長の $L/4$ 位置に挿入した場合、Fig.3(a)のように共振器内ではパルスが4本立つため可飽和吸収色素セル内でパルスが重ね合わさるが、もう一方の $L/4$ の位置(出力鏡側)でもパルスを重ね合わせる事ができる。そこで、Fig3(b)のように $L/4$ の位置にGaAsを挿入すればパルスの重なりにより、光強度を高め2光子吸収を増加させることができる。この2光子吸収の増加と共に自己発散効果も強くなり、共振器内の損失が増加するのでパルス列を更に拡張させることができると考えられる。しかし、この場合ロッド側から出力鏡側に向かうパルスは、GaAsを通過した後ピンホールによるエネルギー制御を受けていない。従って、GaAsと出力鏡の間にピンホールをもう一枚挿入してGaAsの両側でエネルギー制御を行えば更にパルス列を拡張させることができると考えられる。

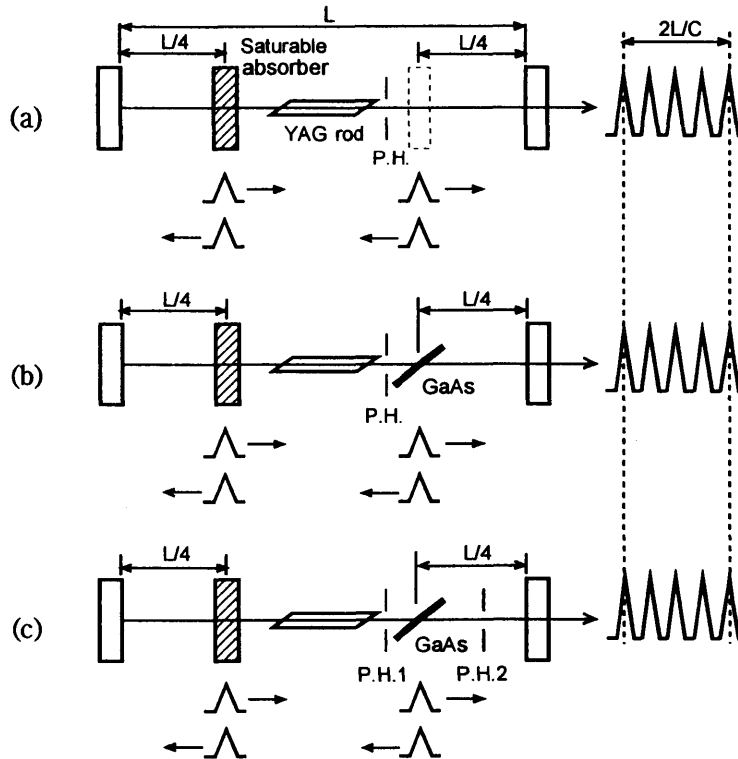


Fig.3 FCM operations in joint with CPM.

(a) Only CPM with SA cell at $L/4$.

(b) Enhanced FCM with GaAs at $L/4$ and 1 pinhole.

(c) Enhanced FCM with 2 pinholes.

3 YAG レーザのCPM-FCM複合発振

3.1 実験方法及び装置

YAG レーザのCPM-FCM複合発振の実験系をFig4に示す。共振器は長さ1.2mのファブリペロー共振器として、出力鏡、反射率にはそれぞれ80%、100%のくさび形にカットしたものを使用した。YAG ロッドは、長さ90mm、直径7mmのものを使用し、共振器の中央に配置した。このロッドの両端は、

ブリュスター角(61.2°)にカットされ、反射による損失を軽減している。励起光源には2本のXeフラッシュランプを使用した。可飽和吸収色素には、緩和時間の短いNDL-112(日本感光色素)を使用し、溶質には1-2ジクロロエタンを用いた。色素セル厚は 0.5mm とし、反射鏡から光学的に共振器長の $1/4$ のところにブリュスター角(56.4°)で挿入したCPM発振を行わせた。

これまでの予備的なCPM発振でのパルス幅短縮について回折格子対を用いて検証したところ、ロッドによるアップチャープによるパルス幅の広がり、前述の可飽和吸収色素による(c)(d)の効果により相殺されていることが分かった[17]。それ故、これ以上のパルス幅短縮を行うことは(a)(b)の効果をも有効に働かすFCM発振の併用が必要である。

そこで、GaAs(undoped,[100]: 0.45mm 厚 $\times 50\text{mm}$ φ)をブリュスター角(74.0°)で出力鏡側に挿入してFCM発振を行った。この時、出力鏡から共振器長の $1/4$ の位置に精確に挿入して、GaAs内でパルスを重ね合わせ2光子吸収を増加をさせるため、トランスレータで位置を調節できるようにした。また、共振器長はGaAs($n=3.48$)によりおよそ 1.4mm 程長くなるため、可飽和吸収色素セルの位置を最適位置からロッド側に 0.35mm 程移動させた。ピンホールは 2.5mm φのものを使用しロッドとGaAsの間に挿入した。そして、GaAs内でのパルスの重なりによる効果を調べるため、GaAsをロッド側、出力鏡側に 1mm ずつ移動させてパルス幅、パルス列幅の測定を行った。パルス幅の測定には、1ショット毎比較的容易に行えるTPF(2光子蛍光)法を用いた。また、出力の一部をバイブラナー光電管に導き、 350MHz のオシロスコープ(岩崎通信機SS-7635)で、モード同期のかかり具合とパルス列幅を観測した。パルスエネルギーの測定にはジュールメーターを用いた。

次に、Fig.4(b)に示すように、ピンホールをGaAsの両側に挿入しFCM発振を行った。可飽和吸収色素の濃度を変えて、パルス幅が最も短く、パルス列幅が最も長くなる最適色素濃度を求めた。その上で、GaAsをロッド側、出力鏡側に 1mm ずつ移動させてパルス幅とパルス列幅の測定を行った。

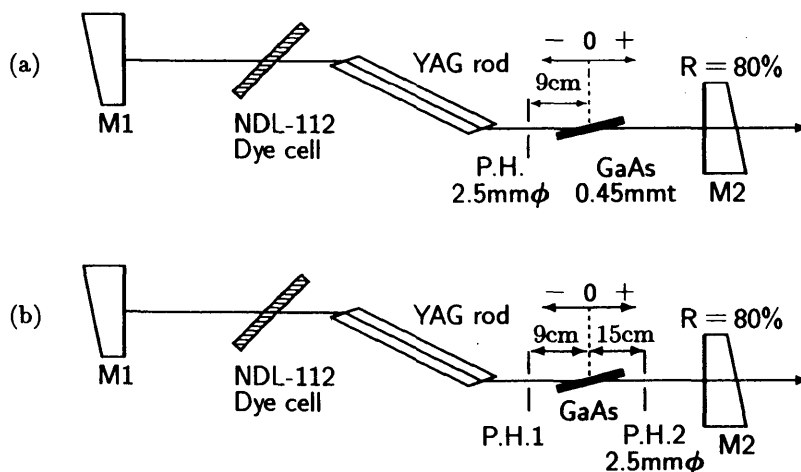


Fig.4 Experimental setup of CPM-FCM · YAG laser.

(a) 1 pinhole inserted (b) 2 pinholes inserted

3.2 実験結果

3.2.1 ピンホール1枚によるエネルギー制御

GaAsの位置を変えたときの平均パルス幅と平均パルス列幅の変化をFig.5に示す。

この実験で使用した可飽和吸収色素の濃度は $7.0 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ である。Fig.5より共振器長の1/4である0mmの位置においてパルス列幅は最も長く580nsとなった。そして最もパルス幅が短く、Gaussian波形とすると最短4.7ps平均5.3psとなり、 sech^2 波形では最短4.3ps平均4.8psとなった。また、0mmの位置からずれるに従って、パルス列幅は短くなりパルス幅は広がっている。

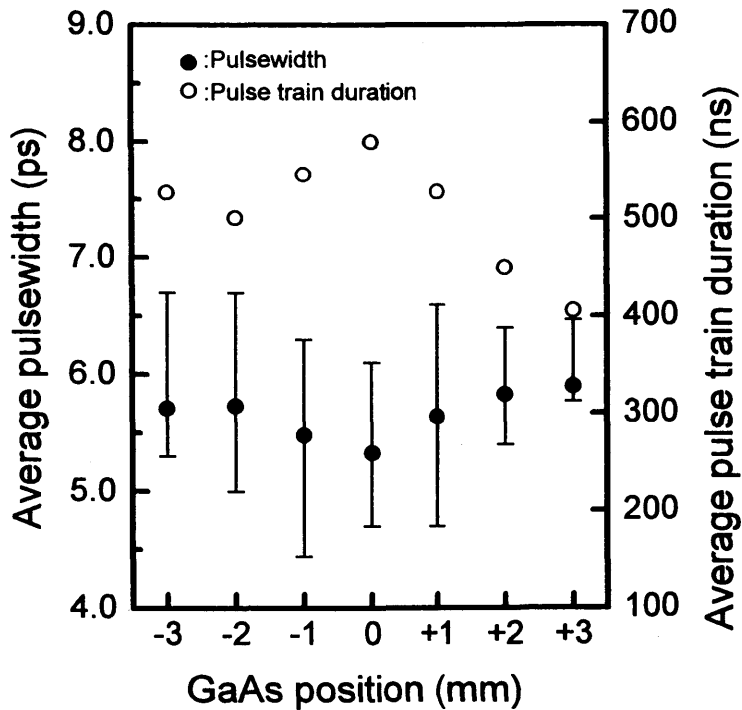


Fig.5 Dependence of the average pulsewidth and pulse train duration on GaAs position.

3.2.2 ピンホール2枚によるエネルギー制御

ピンホールを2枚にしたときは、共振器内損失が増大するので、改めて平均パルス幅、平均パルス列幅の色素依存性を調べた。その結果をFig.6に示す。その上でGaAsの位置を変えたときの平均パルス幅、平均パルス列幅の変化をFig.7に示す。

Fig.6より $7.0 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ 付近の濃度のとき、パルス幅が最も短く、パルス列幅は最も長いため、この濃度が最適色素濃度であると思われる。この濃度で再びGaAsを移動させた結果、Fig.7より0mmの位置において最もパルス幅が短く、Gaussian波形とすると最短3.3ps、平均3.6psとなり、ばらつきは $\pm 0.3 \text{ ps}$ と非常に小さくなった。また、 sech^2 波形では最短3.0ps、平均3.2psとなった。パルス列幅は $780 \text{ ns} \pm 50 \text{ ns}$ となったため、パルス本数はおよそ400本だと思われる。

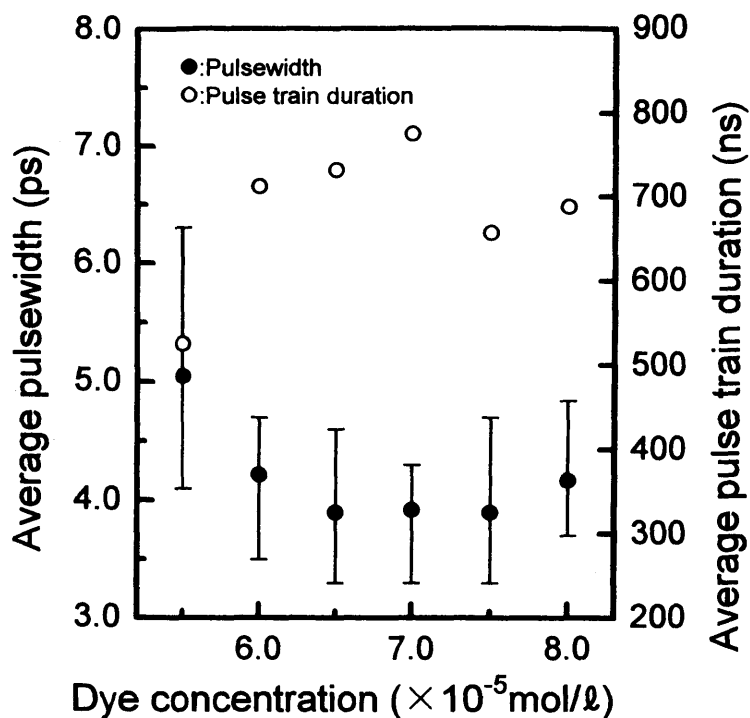


Fig.6 Dependence of the average pulsewidth and pulse train duration on cell dye concentration.

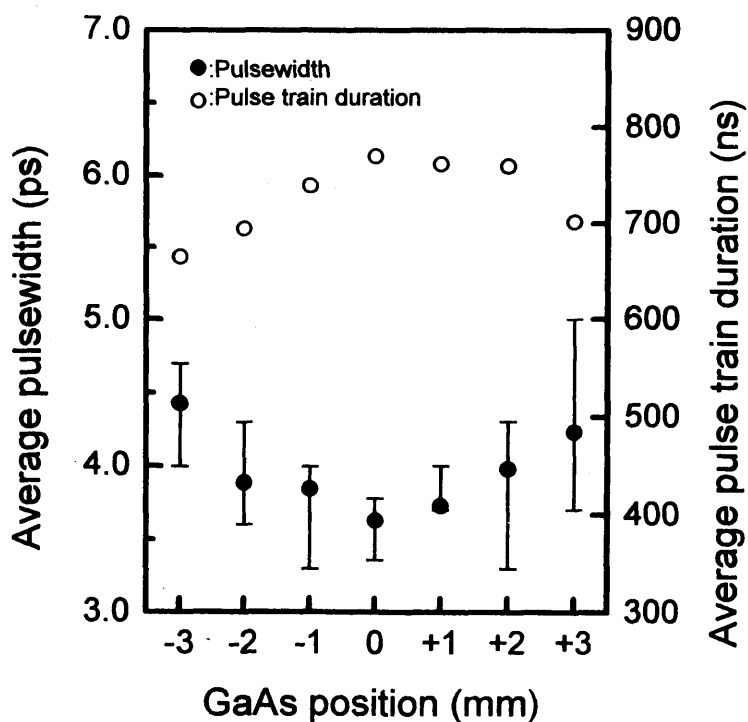


Fig.7 Dependence of the average pulsewidth and pulse train duration on GaAs position.

Concentration of saturable absorber NDL-112 is 7.0×10^{-5} mol/l

3.3 検討・考察

CPMにFCMを併用することでパルス幅が非常に短くなり、平均パルス幅と最短パルス幅の差も小さくなりパルス幅が安定している。これは、NFEにより急激な利得の立ち上がりと飽和を抑えてパルス列の拡張、即ち共振器内におけるパルス周回数の増加により、可飽和吸収色素のパルス幅短縮効果を多く受けているためと考えられる。これまでに、およそ30回の周回を経てパルス幅は非常に短くなったと報告されている[16, 18]。今回の実験データからパルス列幅とパルス幅の関係を求めるとFig.8のようになった。パルス列が長くなるに従ってパルス幅が短くなっていることが分かる。CPMのパルス列は80nsとパルス周回数は10回程度であるため、発振の初期状態における不安定によってパルス幅のばらつきが大きい。FCMを併用することによりパルス周回数が増えて可飽和吸収色素を通過する回数も増え、その短縮効果によってより一層パルス幅が短縮されたと考えられる[10]。

GaAsの両側にピンホールを挿入することによりパルス列は500nsから780nsに拡張された。GaAsを共振器長の1/4の位置へ挿入したことでGaAs内でパルスが重ね合わさり、2光子吸収が増加し自己発散効果が強められ、更にGaAsの両側にピンホールを入れたことで、エネルギー制御が有効に働いたためと考えられる。

色素濃度についてみると、CPMのみの最適色素濃度は $4.5 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ 付近であったが、CPMとFCMを併用したときは $7.0 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ 付近と濃度が濃くなった。これは、NFEとピンホールを2枚挿入したことにより共振器内損失が増加し、その分発振しきい値が高くなったために入力が増大が必要となり濃度の増大が要求されたと考えられる。

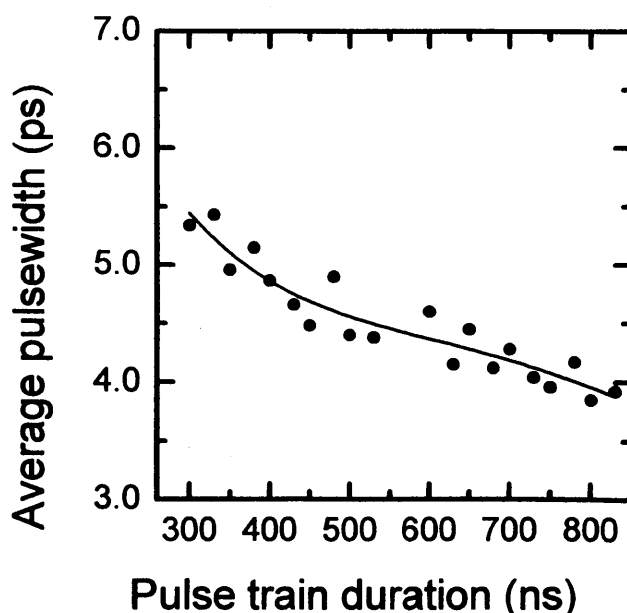


Fig.8 Dependence of the pulsewidth on pulse train duration .

Table II The pulsewidth in Gaussian shape(sech²) and pulse train duration.

		CPM	CPM+FCM	
		1 Cell	1 Pinhole	2Pinholes
Pulsewidth (sech ²)	Shortest (ps)	8.0 (7.3)	4.7 (4.3)	3.3 (3.0)
	Average (ps)	15.8 (14.4)	5.3 (4.8)	3.6 (3.2)
Energy/pulse (μ J)		40	10	7
Pulse train duration (ns)		80	580	780
Number of pulses		40	290	390

4 まとめ

以上、CPMとFCMを併用しモード同期YAGレーザーのパルス幅の短縮を行った。この結果、パルス列が拡張されパルス幅が大幅に短縮されると共にパルス幅のばらつきも非常に小さくなった。このことからGaAsを共振器長の1/4の位置に挿入したことでピンホールをGaAsの両側に入れたことにより、2光子吸収の増加と、より有効なエネルギー制御を行うことができたと考えられる。

今回の実験で得られた結果をTable IIに示す。パルス幅をTable Iで見ると他の研究と比較すると、我々の得た3psはフラッシュランプ励起YAGレーザーの中では最短と思われる。また、パルス本数はパルス列の拡張の他にパルス間隔が狭くなったことにより格段に増加している。新しいモード同期法であるKLMで3ps、APMで6psのパルスが得られているが、我々のFCMの方が共振器構成が簡単である。KLMではパルスエネルギーが1 μ Jと小さい。KLMではパルスエネルギーが大きくなるとカー媒質が損傷されると考えられるため、パルスエネルギーの大きいYAGレーザーへの適用は不都合だと考えられる[11]。従って、YAGレーザーにCPMとFCMを適用することは、尖頭出力の高い超短パルスの発生が容易であり、パルス幅とパルス間隔の短縮や、パルス本数の増加に有効であることが分かった。これらのことは、同期励起近赤外色素レーザーの光源として有用であり、また大容量光通信や光計測の高精度化にも寄与できると考えられる。この研究の一部は、英文で報告する予定である[19]。

参考文献

- [1] H.Al-Obaibi, R.J.Dewhurst, G.A.Oldershaw and S.A.Ramsden; Optics Comm. 14 (1975) 219.
- [2] P.Liu and R.Yen; Appl.Opt.18 (1979) 600.
- [3] H.Graner, A.Laubereau; Optics Comm. 37 (1981) 138.
- [4] H.Vanherzeels, J.L.Van Eck, A.E.Siegman; Appl.Opt. 20 (1981) 3484.
- [5] J.Weston, P.H.Chiu, R.Auber; Optics Comm. 37 (1987) 208.
- [6] A.Del Corno, G.Gabetta, G.C.Reali, V.Kubecek, J.Marek; Opt.Lett. 15 (1990) 734.
- [7] L.Y.Lyu, J.M.Huxley, E.P.Ippen, H.A.Haus; Opt.Lett. 15 (1990) 553.

- [8] S.Kumazaki, V.Kubecek, Y.Takagi, G.C.Reali, K.Yoshihara; Jpn.J.Appl.Phys. 31 (1992) 413.
- [9] F.Lindenber, R.Stöckl, R.Laenen, A.Laubereau; Optics Comm. 117 (1995) 268.
- [10] 北嶋巖, 工藤康二, 加瀬谷浩康; レーザー研究 24 (1996) 1091.
- [11] I.Kitazima, K.Kudoh; Optics Comm. 137(1997)290.
- [12] R.L.Fork, B.I.Greene, C.V.Shank; Appl.Phys.Lett. 38 (1981) 671.
- [13] 工藤康二, 北嶋巖; 福井大学工学部研究報告 43 (1995) 165.
- [14] A.Agnesi, A.Del.Corno, P.Di.Trapani, M.Fogliani, G.C.Reali, J.C.Diels, C.Y.Yen, X.M.Zhano
V.Kubecek; IEEE J.Quantum Electron. QE-28 (1992) 710.
- [15] J.M.Ralston, R.K.Chang; Appl.Phys.Lett. 15 (1969) 164.
- [16] V.Kubecek, S.Kumazaki, Y.Takagi, K.Yohihara, G.C.Reali; Jpn.J.Appl.Phys. (1991) 1805.
- [17] 加瀬谷浩康, 豊嶋卓次, 鈴木礼, 北嶋巖; 福井大学工学部研究報告 44 (1996) 61.
- [18] A.Agnesi, G.C.Reali; Optics Comm. 81 (1990) 306.
- [19] I.Kitazima, H.Kaseya; to be reported elsewhere.

